

# AGROMETEOROLOGIA Y TELEDETECCION SATELITAL

Adolfo Marroquín Santoña  
*Centro Meteorológico de Extremadura*

## INTRODUCCION

Me propongo enfocar este artículo como continuación y complemento del que con el título "La teledetección como herramienta agrometeorológica" se publicó en el Calendario del año 92. Quiero aclarar, por si alguien trata de localizarlo, que en el índice de aquella publicación aparece el citado trabajo como "Calendario Meteorológico 1992", pág. 212 a 218.

Dicho lo anterior, vuelvo a insistir en algo que ya señalaba entonces, y es el hecho de que los satélites meteorológicos (básicamente la serie de los NOAA o de los geoestacionarios tales como el METEOSAT, GOES, etc, y sobre todo la próxima generación de estos geoestacionarios, multicanales y con resolución de hasta 1 Km para los GOES, o de 3 para el METEOSAT) permiten ya, y mucho más en el futuro, obtener datos climáticos de interés, complementarios de los suministrados por las redes climatológicas convencionales, tanto desde el punto de vista de su cobertura espacial como temporal.

## INDICES DE VEGETACION

Si las variaciones espaciales o las evoluciones temporales de las reflectancias e irradiancias medidas en una u otra de las bandas espectrales de los radiómetros de los satélites permiten efectuar observaciones interesantes, resulta claro que la combinación de diferentes bandas espectrales puede aportar informaciones cuantitativas susceptibles de aplicaciones automatizadas. Las posibles combinaciones son evidentemente muy numerosas, pero la mayoría de los índices utilizados a partir de los datos de NOAA AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), Landsat MSS (Multispectral Scanner System) y Landsat TM (Thematic Mapper), se apoyan en el contraste entre vegetación y suelo en las bandas del espectro visible (VIS) e infrarrojo próximo (IRP). Según la banda o bandas utilizadas se generan los diversos índices de vegetación, de los que los más significativos son los siguientes:

En primer lugar, las relaciones directas entre los canales del MSS ( $R_{45} = CH_4/CH_5$ ,  $R_{46} = CH_4/CH_6$ , etc, siendo CHN el valor medido por el Canal N). Las relaciones  $R_{56}$  y  $R_{57}$  constituyen un buen indicador del crecimiento de la cubierta vegetal, pero su inestabilidad y sensibilidad a las correcciones atmosféricas han conducido a la elaboración de un índice normalizado más estable.

Introduciendo la diferencia (y no la relación directa) entre las medidas en el VIS y el IRP, normalizado por la suma de las mismas, se obtiene el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Por ejemplo, para el Landsat MSS es

$$NDVI_{65} = (CH_6 - CH_5) / (CH_6 + CH_5)$$

$$NDVI_{75} = (CH_7 - CH_5) / (CH_7 + CH_5)$$



y, para el NOAA AVHRR, el índice de vegetación es:

$$VI = CH_2 - CH_1$$

y la diferencia normalizada:

$$NDVI = (CH_2 - CH_1) / (CH_2 + CH_1)$$

siendo éste el índice de vegetación más habitualmente utilizado. Por otra parte, los índices de vegetación Landsat MSS y NOAA AVHRR están en buena concordancia para una misma región, con altas correlaciones ( $r$  del orden de 0.86), lo que en principio permitiría aprovechar la bondad del NDVI de NOAA, junto a la alta resolución del MSS.

El índice NDVI es sensible a la vegetación a partir de una cobertura de suelo por la vegetación que alcance el 15%, presenta sin embargo el inconveniente de una saturación para un índice foliar ( $LAI = \text{Superficie foliar} / \text{Superficie total}$ ) del orden de 2 a 3.

Para vegetación, el rango de valores del NDVI está entre 0.1 y 0.6, los valores más altos están asociados con gran densidad de plantas y fuerte "verdor" del dosel de la cubierta vegetal. Los efectos atmosféricos tales como la difusión por polvo y aerosoles, difusión de Rayleigh y nubes de tamaño inferior al pixel, todo ello actúa incrementando  $CH_1$  con respecto a  $CH_2$  y reduciendo el índice de vegetación que se calcula.

Las rocas y el suelo desnudo reflejan similarmente en el VIS y en el IRP, por lo que su NDVI es aproximadamente igual a cero. Las nubes, el agua, la nieve, etc., reflejan más en el VIS que en el IRP, pudiendo por tanto obtenerse valores negativos del NDVI, para evitarlo se ha hecho una ligera modificación del ND, sumándole un valor 0.5, e introduciendo la raíz cuadrada para estabilizar la varianza. Se obtienen así los índices transformados:

$$TVI_6 = (NDVI_{65} + 0.5)^{1/2}$$

$$TVI_7 = (NDVI_{75} + 0.5)^{1/2}$$

Un análisis más sofisticado de los datos contenidos en los 4 canales del Landsat MSS ha conducido a proponer una transformación ortogonal en un nuevo espacio de 4 dimensiones. Los 4 ejes así obtenidos llevan los nombres de "brillo" (BR), "verdor" (GN), "amarilleo" (YN) y "no específico" (NS), según las características que las medidas sobre cada uno de los ejes quieren identificar. Estos índices se obtienen como combinación lineal de las medidas de los canales 4 al 7 de Landsat MSS.

Sin embargo, habida cuenta de las propiedades de las bandas del Landsat, resulta que únicamente los dos primeros índices, BR y GN, tienen un interés real. Puesto que BR puede aparecer como una reflectancia global ponderada sobre la gama total de las medidas del MSS, y GN se aproxima mucho a un índice de vegetación del tipo diferencia entre VIS e IRP, mientras que las combinaciones lineales de YN y de NS no tienen correspondencia efectiva con las propiedades en cuestión.

La evolución temporal de estas propiedades espectrales, en particular "brillo" BR y "verdor" GN, para la estación de vegetación de un cultivo conduce al análisis de una figura geométrica que ha sido denominada "tasseled cap", por su parecido con un go-



ro de dormir. La aplicación de esta técnica permite analizar la evolución temporal del cultivo en relación con sus etapas fenológicas.

Con objeto de mejorar la sensibilidad del índice de verdor GN frente a estrés hídricos, se ha propuesto el "Green Index Number" (GIN), a partir del porcentaje de elementos (pixels) de una escena Landsat con valores de verdor superiores a un umbral dado y que indican por tanto una cobertura completa por una vegetación verde.

La comparación de la evolución temporal de los valores "normales" del GIN para un cultivo dado con los del GIN observado para un cultivo real bajo estudio, permite establecer una clasificación de condiciones de estrés para ese cultivo.

## **PANTALLA NUBOSA**

Evidentemente, cuando se trata de estudiar desde el espacio lo que está ocurriendo "en el suelo", las nubes actúan como elementos perturbadores. Ahora bien, de acuerdo con los resultados obtenidos en diversos trabajos sobre el tema de la cobertura nubosa analizada desde satélites, en un día cualquiera alrededor de la mitad de la superficie de la Tierra está cubierta de nubes. Esto presenta una primera dificultad, a la que hay que añadir el hecho de que el paso a media tarde de los satélites NOAA actualmente operativos complica el problema dado que es frecuente la presencia de pequeños cúmulos típicos y específicos de esas horas del día para nuestras latitudes.

Se han investigado varias técnicas para reducir la contaminación óptica producida por las nubes. Una es filtrar los datos en el proceso de cartografiado, de modo que se plotea el valor más alto del índice de vegetación encontrado en el conjunto de pixels básicos que componen la imagen compuesta a utilizar. El inconveniente de este método es que bajo condiciones de cielos totalmente despejados se seleccionan las áreas más verdes dentro del conjunto de localización, lo que hace que el mapa obtenido sea menos representativo de las condiciones típicas de vegetación en las áreas descubiertas. Otra técnica que es menos efectiva como filtro de nubes, pero que produce un muestreo aleatorio de la vegetación, es fijar un umbral en el brillo del canal visible para diferenciar las nubes. Con ambos métodos los datos que se plotean para el índice de vegetación en una imagen compuesta básica corresponden al valor medido en un pixel simple del AVHRR y no al promedio del área.

Para reducir más la contaminación nubosa, se generan índices compuestos de vegetación máxima semanal utilizando las siete series de datos diarios. Para cada período compuesto se establecen los datos de cada emplazamiento para el día que presenta el mayor valor para el NDVI. Esto reduce notablemente el efecto de la nubosidad en la composición, excepto para áreas que hayan permanecido nubosas durante los 7 días. La utilización del valor máximo en la composición mejora también el producto al ser automáticamente excluidos algunos efectos atmosféricos que de hecho reducen el índice de vegetación computado.

## **AVALUACION DE PRODUCTOS Y APLICACIONES.**

Los índices de vegetación derivados de observaciones desde satélites están relacionados con la cantidad y condición de la vegetación observada. Por eso los productos satelitales más útiles son los ploteos de las series temporales de los índices de vegetación sobre las regiones de interés. Las series temporales de los índices de



vegetación ploteadas son comparadas con las correspondientes al año o años anteriores. Estas comparaciones pueden revelar tendencias significativas en la reflectancia de la vegetación a pesar de las condiciones variables de la atmósfera. Naturalmente, la comparación de índices para evaluar el estrés de los cultivos trabaja mejor en las regiones donde se producen un número razonable de días despejados durante la estación de cultivo.

## **IDENTIFICACION DE LOS CULTIVOS Y ESTIMACION DE LA SUPERFICIE CULTIVADA.**

La identificación de los cultivos y la estimación de las superficies cubiertas no es, estrictamente hablando, un tema del dominio de la agrometeorología. Sin embargo, constituyen un elemento de información importante a la hora, por ejemplo, de la estimación de las predicciones de cosechas.

### **Historia de algunos trabajos pasados.**

La estimación de las superficies cultivadas mediante observación satelital está operativa desde hace ya bastantes años, concretamente a partir del proyecto A<sup>^</sup>X]D,C, centrado sobre el trigo (U.S.A., Canadá, U.R.S.S.). Se puso a punto una técnica de muestreo basada en el análisis de una unidad elemental, llamada "segmento", de dimensiones 5 x 6 millas náuticas, es decir alrededor de 9 x 10 km. Las tres fases de la operación permitieron el tratamiento sucesivo de 700 segmentos en la fase I (1974-75), 1800 en la fase II (1975-76) y 3000 en la fase III (1976-77), con un plazo de tratamiento del orden de un mes.

La estimación de las superficies fue muy satisfactoria sobre la CEI, antigua URSS, encontrándose algunos problemas en los casos de USA y Canadá, probablemente debido, por una parte, a una serie de posibles confusiones entre el trigo de primavera y otros cultivos como la cebada, y por otra parte a problemas de insuficiente resolución espacial en algunas de las zonas.

La evolución de los trabajos en la fase post-LACIE, y en los comienzos del AgRIS-TARS, ha permitido mejorar los procedimientos de clasificación automática, introduciendo métodos estadísticos más refinados y utilizando tratamientos multitemporales apropiados para separar los distintos cultivos. Simultáneamente, la aplicación de curvas de reflectancia espectrales ha permitido también desarrollar y perfeccionar la cartografía de la ocupación de los cultivos.

### **Análisis de la situación y perspectivas.**

De modo general, los últimos trabajos muestran la importancia de obtener los datos espectrales en fechas bien definidas. Así, en el caso del maíz-soja, dos adquisiciones MSS aportan las informaciones esenciales, una al comienzo de la estación para reducir la confusión entre los dos cultivos y otros tipos de cubierta del suelo, la otra después de la floración masculina del maíz para su diferenciación. Bajo esta óptica, la posibilidad de utilizar los datos espectrales para identificar el estado de desarrollo de los diferentes cultivos resulta evidentemente muy importante.



## **Caso Particular de superficies de regadío.**

Otra aplicación de la teledetección satelital, dirigida también a identificar las superficies, y con los mismos problemas (muestreo, resolución espacial limitada, correcciones atmosféricas, etc.) corresponde a la identificación de los cultivos de regadío. Este caso presenta sin embargo un interés suplementario en el cuadro de las previsiones de rendimiento, puesto que es evidente que el rendimiento de estos cultivos será determinado por procesos muy diferentes, desde el punto de vista agrometeorológico, de los correspondientes a los cultivos de secano, permitiendo además actuar en la modificación del estado del cultivo mediante el riego. Los primeros trabajos se basaron en la fotointerpretación en falso color, en el que las superficies irrigadas aparecían en rojo brillante como consecuencia de la fuerte reflectancia de la vegetación en el IRP. El desarrollo de técnicas automáticas ha conducido a la puesta a punto de métodos que combinan los datos de los canales 5 y 7 del MSS.

## **ANALISIS Y PREDICCIÓN DE RENDIMIENTO**

El análisis y la predicción de rendimientos representa el objetivo esencial de los modelos agrometeorológicos, y la utilización de la teledetección satelital para este objetivo es una de las aplicaciones más importantes.

Si la identificación de los cultivos y la estimación de las superficies cultivadas está en situación prácticamente operacional, no ocurre lo mismo con la utilización de los datos de la teledetección en los modelos de predicción de rendimientos de cosechas. Pueden proponerse diferentes métodos para el establecimiento de relaciones estadísticas en que se basan los modelos más generales, siguiendo un camino muy similar al adoptado para los modelos agrometeorológicos clásicos de predicción de rendimientos.

Algunos de estos métodos son:

### **1. Establecimiento de relaciones empíricas entre los datos multiespectrales y el rendimiento.**

Este método es evidentemente el más simple, y el más susceptible de aplicación inmediata. Se basa en la evidencia de las relaciones observadas en las experiencias en el suelo utilizando medidas radiométricas del terreno sobre parcelas experimentales.

Son muchas las relaciones observadas entre el rendimiento de los cultivos y las medidas radiométricas obtenidas por los distintos canales de los radiómetros instalados a bordo de los satélites, en particular los canales 1 y 2 del NOAA AVHRR, y los 3, 4, 5 y 7 del Landsat TM. Sin embargo, resulta claro que las relaciones establecidas no pueden ser aplicadas más que para las regiones y para los cultivos específicos para los que han sido ajustadas. Se trata ahora de obtener métodos más generales que permitan una utilización más amplia.

### **2. Establecimiento de relaciones empíricas entre los datos multiespectrales y la biomasa vegetal.**

Es una variante del método empírico dirigida al establecimiento de relaciones, no ya directamente con el rendimiento, sino con la biomasa (MS : Materia Seca), que constituye un intermediario lógico para la descripción del rendimiento.



Los primeros trabajos comenzaron en los años 70, tanto en el laboratorio como sobre el terreno, y pusieron en evidencia las relaciones entre las medidas de reflectancia y el binomio formado por el índice foliar (LAI) y las propiedades ópticas de las hojas. En la actualidad existen numerosos trabajos, desde los que establecen relaciones lineales entre los índices de vegetación y el índice foliar, pasando por los que proponen formas cuadráticas u otras más complejas. Como antes apuntábamos, se presenta una saturación de los índices para valores del LAI del orden de 2.5, lo que ha llevado a algunos autores a proponer igualmente relaciones exponenciales entre MS y NDVI a partir de las bandas del TM. Esta saturación implica evidentemente una restricción a la utilización de estos índices, solamente posible durante las primeras etapas del crecimiento de la biomasa.

La generalización de este método para la estimación de rendimientos se encuentra con dos problemas esenciales. En primer lugar, si bien la biomasa o MS acumulada es un indicador del funcionamiento global del cultivo, las relaciones con el rendimiento son variables a lo largo de la evolución del cultivo. Las aplicaciones esenciales deberán pues situarse en el dominio de las praderas y pastizales, donde la producción se expresa directamente por la biomasa. Por otra parte, las relaciones entre índice de vegetación e índice foliar (LAI) varían en relación con la geometría de la cubierta y no son estables de una cubierta a otra para un mismo año, o de un año a otro para un mismo cultivo.

La disponibilidad de datos multitemporales suficientes para seguir en el tiempo la evolución de la biomasa es un imperativo tan importante que la mayor parte de las aplicaciones desarrolladas se apoyan desde hace años en los datos NOAA AVHRR. Los programas desarrollados se enfocan hacia una vigilancia global continua de la vegetación a partir del índice de vegetación NDVI.

### 3. Seguimiento de los cultivos y modelización del rendimiento.

Habida cuenta de las evidentes limitaciones de los métodos empíricos, las investigaciones evolucionan hacia un camino más largo, tratando de combinar diferentes informaciones provenientes de la teledetección para integrarlas en los modelos clásicos agrometeorológicos. Algunos de estos caminos son:

a. *El calendario de cultivos.* El análisis de los datos espectrales y la interpretación de los diferentes índices pueden aportar información sobre el estado de desarrollo y la etapas fenológicas de los diferentes cultivos.

b. *Producción de materia seca (MS) por la radiación solar interceptada.* De la estimación de la producción de MS, puede resultar una contribución significativa a la previsión del rendimiento, no por estimaciones empíricas, sino por la medida de la energía solar interceptada por la cubierta vegetal.

La radiación fotosintética activa (PAR) interceptada por la vegetación (IPAR) es convertida en MS total, desde la germinación hasta la maduración, con un coeficiente de conversión de la energía solar en MS que varía de 1 a 3 g/(W/m<sup>2</sup>).

La estimación de la IPAR se basa en el conocimiento de la PAR (alrededor de 0.5•Rg, siendo Rg la radiación solar global) y de la proporción interceptada (I) en función del índice foliar LAI:

$$I = 1 - \exp (-0.79 \cdot LAI)$$



o en función del "verdor" GN:

$$I = -0.1613 + 0.0811 \cdot GN - 0.0015 \cdot GN^2$$

c. *Seguimiento del estado de los cultivos.* De modo general, los satélites suministran informaciones muy valiosas sobre las condiciones generales de los cultivos. En primer lugar la extensión de las catástrofes naturales, tales como las inundaciones, fuertes tormentas, heladas extremas, etc., incluyendo por ejemplo la delimitación de las zonas afectadas por las heladas.

En la estimación normal del calendario de cultivos, es igualmente posible obtener informaciones sobre el estrés hídrico a partir de los datos espectrales, permitiendo apreciar la extensión de las superficies afectadas por dicho estrés hídrico.

Otra categoría de informaciones particularmente interesante habida cuenta de su influencia en los rendimientos a escala global, es la que se refiere a la detección y extensión de enfermedades de orden fitosanitario (ataques parasitarios, enfermedades criptogámicas, etc.). Numerosos estudios en laboratorio y en campo han demostrado las relaciones entre las medidas espectrales y el estado fitosanitario.

d. *Contribución a los modelos agrometeorológicos.* A partir de la estimación de la radiación solar interceptada, los datos espectrales permiten establecer modelos de producción de MS que, combinados con el estado hídrico y con funciones de la temperatura, que también pueden obtenerse de Ts (la temperatura de suelo o de "piel" en el caso de los cultivos), suministran modelos de predicción de la producción.

Un modelo completo es el ECG (Energy Crop Growth)

$$ECG = \sum_g^m Rg \cdot I \cdot (ETR/ETP) \cdot F(T)$$

que incluye la irradiación global Rg, la fracción interceptada I (en %), la relación de la evapotranspiración real ETR a la potencial ETP, y un factor térmico F(T) extendiéndose el sumatorio desde la germinación (g) hasta la maduración (m).

Uno de los problemas que encuentra la aplicación de este modelo determinista de las previsiones de rendimiento efectivas es el mismo que el de los modelos puramente climáticos con relación a los modelos estocásticos, el hecho de que no tienen en cuenta las particularidades de los factores técnicos, que presentan un notable peso en el rendimiento final de los cultivos, (variedades de semillas, preparación técnica del agricultor, fertilizantes utilizados, problemas fitosanitarios, etc.), que condicionan la evolución de los rendimientos en el contexto agrícola. Todos estos factores interactúan fuertemente y no son finalmente identificables por los datos espectrales más que por su efecto conjunto resultante sobre la estructura de la cubierta y las propiedades ópticas de las hojas.

La contribución de la teledetección a los modelos agrometeorológicos está basada en la adquisición de informaciones que se integran en estos modelos. Los dos aspectos que presentan mayor importancia son:

- Por una parte el calendario de cultivo y fenológico.
- Por otra parte la apreciación del factor hídrico, bien directamente mediante la

relación ETR/ETP a partir de los datos satelitales, bien indirectamente por la medida de las consecuencias directas sobre el cultivo, mediante los índices NDVI, TVI6 o GIN.

Dentro del Programa AgRISTARS se puso en marcha un sistema basado en la teledetección de anomalías para modelos de alarma y de reducción de rendimiento ligadas a diferentes tipos de estrés.

La dificultad está en combinar estos modelos de alarma con los modelos de reducción, cuantificando las pérdidas de rendimiento resultantes de la observación de condiciones "peligrosas". Es entonces cuando intervienen los datos de alimentación hídrica o de temperatura que pueden ser deducidos de los satélites meteorológicos. Existen varias líneas de investigación en ese sentido, algunas de ellas basadas en datos METEOSAT y NOAA.

Por otra parte, incluso sin referirnos a un modelo particular, la vigilancia directa de las condiciones del cultivo puede ser un instrumento de gran interés para el agrónomo, bien para la constatación de la extensión espacial de fenómenos climáticos, bien para la comparación de la evolución de situaciones de un año a otro.